

## Analisis Tekno-Ekonomi Kelayakan Jaringan 4G LTE di Wilayah Perbatasan Kepulauan Anambas

Lia Hafiza<sup>\*1</sup>, Reni Dyah Wahyuningrum<sup>2</sup>, Aisyah Novfitri<sup>3</sup>, Seshariana Rahma Melati<sup>4</sup>, Putri Rahmawati<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup> Program Studi Teknik Telekomunikasi Kampus Jakarta, Direktorat Kampus Jakarta, Universitas Telkom, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Semarang, Indonesia

Email: <sup>1</sup>[liahfza@telkomuniversity.ac.id](mailto:liahfza@telkomuniversity.ac.id), <sup>2</sup>[reni.dyahwahyuningrum@polines.ac.id](mailto:reni.dyahwahyuningrum@polines.ac.id),

<sup>3</sup>[aisyahnovf@telkomuniversity.ac.id](mailto:aisyahnovf@telkomuniversity.ac.id), <sup>4</sup>[sesharianarahmam@telkomuniversity.ac.id](mailto:sesharianarahmam@telkomuniversity.ac.id),

<sup>5</sup>[putirrahmawati@telkomuniversity.ac.id](mailto:putirrahmawati@telkomuniversity.ac.id)

### Abstrak

Kabupaten Kepulauan Anambas merupakan wilayah perbatasan berkategori 3T (Tertinggal, Terdepan, Terluar) di Provinsi Kepulauan Riau yang sebagian wilayahnya masih mengalami *blankspot* dan sinyal lemah. Penelitian ini menganalisis kelayakan tekno-ekonomi penggelaran jaringan 4G LTE di wilayah tersebut melalui perencanaan cakupan, analisis kapasitas, kelayakan finansial, dan analisis sensitivitas. Perencanaan cakupan menggunakan model propagasi COST-231 Hata pada frekuensi 1800 MHz, sedangkan kelayakan finansial dievaluasi melalui Net Present Value (NPV), Return on Investment (ROI), dan payback period selama lima tahun. Asumsi utama yang digunakan mencakup tingkat adopsi 42 persen, bandwidth 10 MHz, dan periode evaluasi lima tahun. Hasil menunjukkan bahwa untuk mencakup wilayah seluas 590 km<sup>2</sup> dibutuhkan radius sel 1,90 km dan 19 site eNodeB, dengan total kapasitas jaringan 912 Mbps yang melampaui kebutuhan puncak 228 Mbps. Secara finansial, pada ARPU Rp 43.400 per bulan penggelaran menghasilkan NPV negatif sebesar Rp 43,24 miliar dan ROI -69,8%. Analisis sensitivitas menunjukkan NPV baru mencapai titik impas pada ARPU sekitar Rp242.000 per bulan, jauh di atas daya beli masyarakat setempat. Temuan ini menegaskan bahwa pemerataan akses telekomunikasi di pulau perbatasan terpencil tidak dapat diserahkan pada mekanisme komersial murni, melainkan memerlukan dukungan skema subsidi pemerintah.

**Kata kunci:** 4G LTE, analisis sensitivitas, Anambas, COST-231 Hata, tekno-ekonomi

### Abstract

Anambas Islands Regency is a 3T (frontier, outermost, and underdeveloped) border area in Riau Islands Province where several areas still experience blankspots and weak signals. This study analyzes the techno-economic feasibility of 4G LTE deployment in the region through combining coverage planning, capacity analysis, financial feasibility, and sensitivity analysis. Coverage planning uses the COST-231 Hata propagation model at 1800 MHz, while financial feasibility is evaluated through Net Present Value (NPV), Return on Investment (ROI), and payback period over five years. The main assumptions used include an adoption rate of 42 percent, a bandwidth of 10 MHz, and a five-year evaluation period. The results show that covering a 590 sq km area requires a cell radius of 1.90 km and 19 eNodeB sites, with a total network capacity of 912 Mbps exceeding the peak demand of 228 Mbps. Financially, at an ARPU of IDR 43,400 per month the deployment yields a negative NPV of IDR 43.24 billion and an ROI of -69.8%. Sensitivity analysis indicates that NPV only breaks even at an ARPU of around IDR 242,000 per month, far above local purchasing power. These findings emphasize that equitable telecommunication access in remote border islands cannot rely on purely commercial mechanisms but requires government subsidy support.

**Keywords:** 4G LTE, Anambas, COST-231 Hata, sensitivity analysis, techno-economic

## 1. PENDAHULUAN

Akses telekomunikasi yang merata merupakan prasyarat penting dalam mendukung transformasi digital nasional. Namun, pemerataan tersebut belum sepenuhnya tercapai, khususnya di wilayah

Tertinggal, Terdepan, dan Terluar (3T). Kabupaten Kepulauan Anambas di Provinsi Kepulauan Riau merupakan salah satu wilayah perbatasan strategis di Laut Natuna yang berbatasan langsung dengan negara tetangga, sehingga ketersediaan layanan telekomunikasi tidak hanya menyangkut aspek ekonomi tetapi juga kedaulatan digital. Pemerintah daerah masih mencatat sejumlah titik *blankspot* dan area sinyal lemah meskipun secara administratif sebagian besar desa telah terjangkau jaringan melalui menara program Universal Service Obligation (USO) (Dinas Komunikasi dan Informatika Provinsi Kepulauan Riau, 2025). Program penyediaan menara melalui pendanaan kewajiban pelayanan universal telah membangun ribuan BTS 4G di daerah 3T, namun keberlanjutan layanannya tetap sangat bergantung pada dukungan kebijakan dan pembiayaan pemerintah (Husna, A., & Budiman, L., 2023).

Saat ini layanan di Anambas sebagian besar bertumpu pada menara USO berkapasitas terbatas sehingga kualitas layanan menurun ketika beban meningkat. Ketersediaan tulang punggung serat optik Palapa Ring Barat membuka peluang peningkatan layanan 4G LTE, tetapi penggelaran jaringan di wilayah kepulauan terpencil menghadapi tantangan berupa biaya infrastruktur dan *backhaul* yang tinggi serta basis pelanggan yang kecil dan tersebar. Selain itu, layanan di wilayah ini sangat bergantung pada satu jalur *backhaul* serat optik Palapa Ring Barat sehingga rentan terhadap gangguan, sebagaimana pernah terjadi ketika kabel tersebut terputus dan menyebabkan Anambas kehilangan akses telekomunikasi selama beberapa hari (Diskominfo Kabupaten Natuna, 2021). Oleh karena itu, keputusan investasi tidak cukup dianalisis dari aspek teknis semata, melainkan harus dievaluasi secara tekno-ekonomi yang memadukan kelayakan teknis dan finansial.

Sejumlah penelitian terdahulu telah melakukan analisis tekno-ekonomi penggelaran LTE pada wilayah urban dan suburban (Hikmaturokhman et al., 2018; Salamah et al., 2016), serta kajian kelayakan migrasi jaringan 2G/3G ke 4G di kota besar (Utama et al., 2017). Penelitian lain berfokus pada aspek teknis perencanaan LTE di area rural tanpa mengaitkannya pada kelayakan finansial, sementara kajian tekno-ekonomi pada konteks kepulauan masih jarang ditemukan. Smura (2012) menyediakan kerangka pemodelan tekno-ekonomi jaringan nirkabel yang banyak diadopsi, namun penerapannya pada wilayah dengan permintaan sangat rendah dan struktur biaya kepulauan belum banyak dieksplorasi. Pendekatan analisis teknis yang dipadukan dengan penilaian tekno-ekonomi juga telah diterapkan pada perencanaan jaringan seluler di Indonesia menggunakan indikator NPV, IRR, dan payback period (Nashiruddin et al., 2024; Ridho Prasetyo Wicaksono et al., 2024).

Perkembangan kajian tekno-ekonomi telekomunikasi dalam lima tahun terakhir menunjukkan pergeseran fokus dari sekadar perencanaan teknis menuju penilaian kelayakan ekonomi yang lebih komprehensif. Frank et al. (2022) melakukan analisis tekno-ekonomi terhadap berbagai arsitektur jaringan non-publik 5G dan menegaskan bahwa pemilihan arsitektur sangat menentukan struktur biaya serta nilai investasi. Pada konteks wilayah pedesaan dan terpencil, Koratagere Anantha Kumar dan Oughton (2023) mengembangkan model simulasi untuk strategi layanan universal pita lebar dan menunjukkan bahwa tanpa intervensi kebijakan, banyak wilayah pedesaan tidak akan pernah mencapai kelayakan komersial karena rendahnya kepadatan permintaan. Temuan serupa diperoleh Rech et al. (2025) yang mengkaji untung-rugi penggelaran 5G di Brasil dan menyimpulkan bahwa daerah dengan populasi rendah memerlukan subsidi atau skema berbagi infrastruktur agar penggelaran menjadi layak. Di Indonesia, sejumlah penelitian terbaru berfokus pada perencanaan cakupan dan kapasitas LTE menggunakan model COST-231 Hata, antara lain pada frekuensi 1800 MHz di wilayah pesisir dan perkotaan (Putri et al., 2024; Sahal Fatah & Hikmaturokhman, 2025), serta perencanaan jaringan pada lingkungan khusus seperti jalur kereta (Naufallia et al., 2021). Namun, mayoritas penelitian tersebut menekankan aspek teknis dan belum mengintegrasikan penilaian finansial secara menyeluruh, khususnya untuk wilayah kepulauan perbatasan yang memiliki tantangan biaya *backhaul* dan logistik yang khas. Kondisi serupa juga diidentifikasi oleh de Souza et al. (2021), yang menegaskan bahwa rendahnya penetrasi infrastruktur publik seperti listrik dan jalan di wilayah terpencil cenderung meningkatkan belanja modal secara signifikan, sehingga diperlukan kerangka tekno-ekonomi yang mempertimbangkan karakteristik khas wilayah tersebut. Penelitian mengenai performansi jaringan seluler di wilayah lahan kering kepulauan di Indonesia masih sangat terbatas, namun pada hasil penelitian Kebos et al, performa jaringan 4G pada lahan kering di kepulauan Amarasi, mampu memberikan kualitas sinyal dan throughput yang tergolong baik, sehingga layak untuk mendukung layanan suara dan data. (Kebos et al., 2022). Sementara itu, Sirmayanti et al. (2025) menemukan bahwa

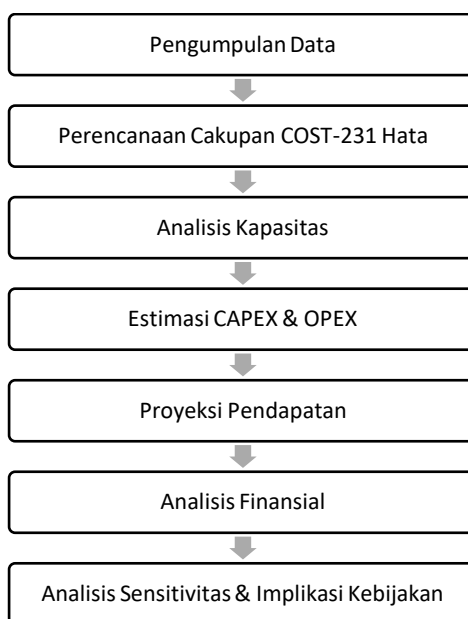
pemanfaatan compact 4G LTE mobile stations di daerah rural bertingkat sinyal rendah secara signifikan meningkatkan kualitas jaringan. Temuan ini menunjukkan bahwa di satu sisi jaringan 4G LTE di wilayah rural dan kepulauan telah mencapai tingkat performansi yang menjanjikan, namun di sisi lain masih diperlukan pendekatan desain jaringan dan evaluasi kelayakan teknis serta ekonomi yang lebih komprehensif.

Kabupaten Kepulauan Anambas memiliki karakteristik yang menjadikannya studi kasus yang relevan. Wilayah ini terdiri atas gugusan pulau yang tersebar di Laut Natuna dengan jumlah penduduk yang relatif kecil, sehingga setiap penambahan infrastruktur menara harus mempertimbangkan keterbatasan akses logistik, pasokan listrik, dan ketergantungan pada satu jalur backhaul serat optik. Kondisi ini berbeda secara mendasar dari wilayah perkotaan yang menjadi objek sebagian besar penelitian tekno-ekonomi sebelumnya, di mana kepadatan pelanggan tinggi membuat investasi cepat kembali. Selain itu, posisi Anambas sebagai wilayah perbatasan menambah dimensi strategis berupa kedaulatan digital, karena ketersediaan layanan telekomunikasi yang andal turut menopang kehadiran negara di kawasan terluar. Dengan demikian, analisis yang memadukan perencanaan teknis dan penilaian finansial pada konteks ini tidak hanya bernilai akademis, tetapi juga memiliki implikasi kebijakan yang nyata bagi program pemerataan akses digital nasional. Studi Wahyudin et al. menunjukkan bahwa ekspansi 4G di wilayah underserved di enam provinsi Indonesia berkorelasi dengan peningkatan indikator ekonomi lokal, sehingga mendukung argumen bahwa investasi jaringan seluler di rural mempunyai justifikasi ekonomi yang kuat (Wahyudin et al., 2025).

Kesenjangan tersebut menjadi dasar penelitian ini. Berbeda dari studi terdahulu yang umumnya berhenti pada satu titik nilai kelayakan, kontribusi penelitian ini terletak pada tiga hal. Pertama, penerapan model tekno-ekonomi terintegrasi secara khusus pada konteks pulau perbatasan 3T dengan karakteristik biaya *backhaul* tinggi dan ARPU rendah. Kedua, penambahan analisis sensitivitas ARPU yang memetakan ambang kelayakan secara eksplisit, sehingga hasilnya dapat menjadi dasar perumusan besaran subsidi. Ketiga, perumusan implikasi kebijakan pembiayaan USO/BAKTI. Penelitian ini bertujuan menjawab tiga pertanyaan: berapa jumlah site eNodeB yang dibutuhkan untuk mencakup wilayah layanan Anambas, apakah kapasitas jaringan memenuhi proyeksi permintaan, dan pada tingkat ARPU berapa pengeluaran 4G LTE menjadi layak secara finansial.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pemodelan tekno-ekonomi yang terdiri atas lima tahap, yaitu pengumpulan data, perencanaan cakupan radio, analisis kapasitas, analisis kelayakan finansial, dan analisis sensitivitas. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

Gambar 1 memperlihatkan bahwa keluaran perencanaan cakupan menjadi masukan bagi analisis kapasitas dan finansial, sehingga ketiganya saling terkait dalam satu model. Parameter masukan dirangkum pada Tabel 1, dengan sumber dan dasar asumsi disertakan untuk setiap kelompok parameter. Pemilihan parameter masukan pada penelitian ini didasarkan pada kombinasi data sekunder dan praktik perencanaan yang lazim digunakan. Data demografi seperti luas wilayah dan jumlah penduduk mengacu pada publikasi Badan Pusat Statistik Kabupaten Kepulauan Anambas, sedangkan parameter teknis radio seperti daya pancar, gain antenna, dan sensitivitas penerima mengacu pada pedoman perencanaan jaringan LTE (Huawei Technologies Co., Ltd., 2010). Tingkat adopsi layanan ditetapkan sebagai asumsi penetrasi yang moderat dengan mempertimbangkan kondisi sosial ekonomi wilayah perbatasan. Nilai efisiensi spektral ditetapkan sebesar 1,6 bps/Hz yang merepresentasikan kinerja rata-rata LTE pada kondisi lapangan, bukan nilai puncak teoretis, agar estimasi kapasitas tidak terlalu optimistis. Rasio pengguna sibuk sebesar sepuluh persen digunakan untuk memodelkan beban pada jam sibuk sesuai praktik dimensioning jaringan. Penggunaan model COST-231 Hata dipilih karena model ini telah terbukti sesuai untuk perencanaan cakupan LTE pada pita 1800 MHz di berbagai wilayah di Indonesia (Putri et al., 2024; Sahal Fatah & Hikmaturokhman, 2025). Untuk parameter finansial, tingkat ARPU mengacu pada laporan kinerja operator nasional, sementara discount rate ditetapkan pada kisaran biaya modal industri telekomunikasi. Seluruh parameter ini bersifat dapat disesuaikan, sehingga model dapat digunakan kembali apabila tersedia data lapangan yang lebih akurat dari operator setempat.

Tabel 1. Parameter Masukan dan Sumber

Parameter	Nilai	Sumber/Dasar
Luas wilayah layanan	590 km <sup>2</sup>	(Badan Pusat Statistik Kabupaten Kepulauan Anambas, 2024)
Total populasi	11.400 jiwa	(Badan Pusat Statistik Kabupaten Kepulauan Anambas, 2024)
Tingkat adopsi	42%	Asumsi penetrasi
Rasio pengguna sibuk	10%	Busy-hour (3GPP)
Throughput per pengguna	0,2 Mbps	Trafik campuran
Frekuensi	1800 MHz	Band LTE umum
Daya pancar eNodeB	43 dBm	(Huawei Technologies Co., Ltd., 2010)
Gain antenna BS	15 dBi	(Huawei Technologies Co., Ltd., 2010)
Sensitivitas penerima	-100 dBm	Spesifikasi UE
Fade margin	10 dB	Praktik umum
Tinggi antenna BS	30 m	Asumsi menara
Bandwidth	10 MHz	Alokasi kanal
Efisiensi spektral	1,6 bps/Hz	Rata-rata LTE riil
Sektor per site	3	Konfigurasi standar
ARPU 4G	Rp 43.400	(Telkom Indonesia, 2025)
Discount rate	10%	WACC telekomunikasi
Periode analisis	5 tahun	Horizon evaluasi

### 2.1. Perencanaan Cakupan

Perencanaan cakupan menggunakan model propagasi COST-231 Hata untuk area rural. Daya pancar efektif (EIRP) dihitung dari daya pancar dikurangi rugi-rugi kabel ditambah gain antenna. Maximum Allowable Path Loss (MAPL) dihitung melalui Persamaan (1).

$$MAPL = EIRP + G_{rx} - S_{rx} - FM \quad (1)$$

Path loss COST-231 Hata dinyatakan pada Persamaan (2), dengan faktor koreksi tinggi perangkat bergerak pada Persamaan (3) dan faktor area  $C_m$  bernilai nol untuk rural/suburban.

$$L = 46,3 + 33,9 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_b) \log_{10} d + C_m \quad (2)$$

$$a(h_m) = (1,1 \log_{10} f - 0,7) h_m - (1,56 \log_{10} f - 0,8) \quad (3)$$

Radius sel ( $d$ ) diperoleh dengan membalik Persamaan (2) terhadap  $d$ . Luas sel heksagonal dihitung melalui Persamaan (4), dan jumlah site ditentukan melalui Persamaan (5) setelah menerapkan planning margin (PM) sebesar 10 persen dengan  $N_s$  sektor per site.

$$A_{sel} = \frac{3\sqrt{3}}{2} d^2 \quad (4)$$

$$N_{site} = \left\lceil \frac{A \cdot (1 - PM)}{A_{sel}} \cdot \frac{1}{N_s} \right\rceil \quad (5)$$

Pada persamaan di atas,  $f$  adalah frekuensi (MHz),  $h_b$  dan  $h_m$  adalah tinggi antenna BS dan perangkat pengguna (m),  $d$  adalah radius sel (km),  $A$  adalah luas wilayah, dan  $A_{sel}$  adalah luas sel heksagonal.

## 2.2. Analisis Kapasitas

Kapasitas per sektor dihitung sebagai perkalian bandwidth dengan efisiensi spektral melalui Persamaan (6). Nilai efisiensi spektral ditetapkan 1,6 bps/Hz mengikuti rata-rata kinerja LTE pada kondisi lapangan, bukan nilai puncak teoretis. Kapasitas total jaringan diperoleh dari kapasitas per sektor dikalikan jumlah sektor, sedangkan kebutuhan kapasitas dihitung dari jumlah pengguna sibuk dikalikan throughput per pengguna.

$$C_{sektor} = BW \times \eta \quad (6)$$

## 2.3. Analisis Kelayakan Finansial dan Sensitivitas

Kelayakan finansial dievaluasi melalui CAPEX, OPEX, dan proyeksi pendapatan tahunan (pelanggan aktif dikalikan ARPU). Indikator yang digunakan adalah NPV pada Persamaan (7) dan ROI pada Persamaan (8), serta payback period. Proyek dinyatakan layak secara komersial apabila NPV bernilai positif. Selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas dengan memvariasikan ARPU untuk menentukan ambang kelayakan.

$$NPV = -CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{(R_t - OPEX_t)}{(1 + t)^t} \quad (7)$$

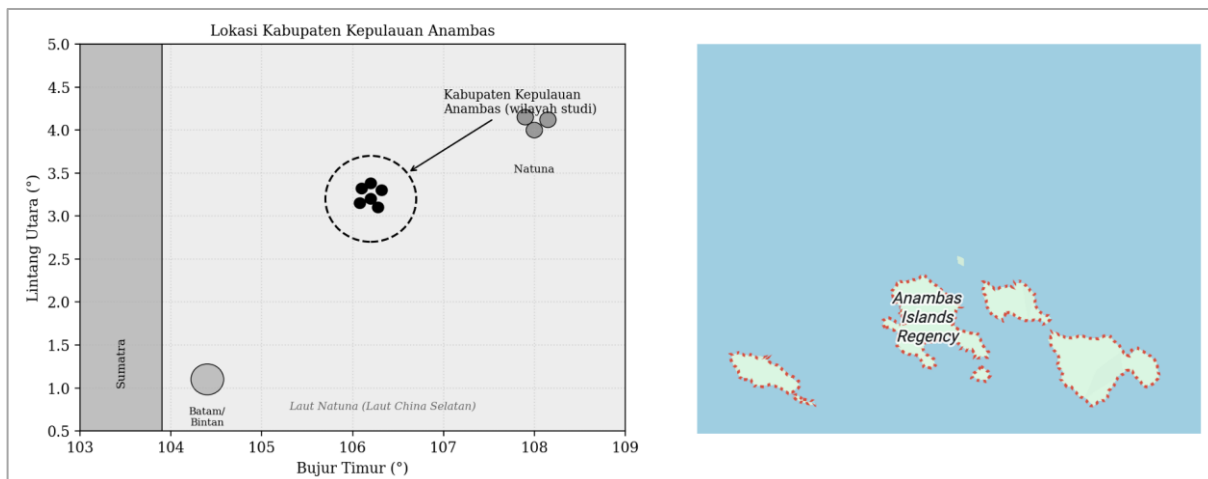
$$ROI = \frac{\sum_{t=1}^n (R_t - OPEX_t)}{CAPEX} \times 100\% \quad (8)$$

dengan  $R_t$  adalah pendapatan tahun ke- $t$ ,  $i$  adalah discount rate, dan  $n$  adalah periode analisis.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil Perencanaan Cakupan

Lokasi wilayah studi ditunjukkan pada Gambar 2, yaitu gugusan pulau di Laut Natuna yang terpisah dari pusat-pusat layanan di Batam dan Bintan. Karakteristik geografis ini menjadi penyebab utama tingginya kebutuhan site dan biaya backhaul.



Gambar 2. Lokasi Kabupaten Kepulauan Anambas

Hasil perhitungan link budget dan perencanaan cakupan ditunjukkan pada Tabel 2. Dengan EIRP 56 dBm dan MAPL 146 dB, model COST-231 Hata menghasilkan radius sel 1,90 km dan luas sel heksagonal 9,36 km<sup>2</sup>. Untuk mencakup luas efektif 531 km<sup>2</sup> dibutuhkan 57 sektor atau 19 site eNodeB pada konfigurasi tiga sektor per site. Radius 1,90 km tergolong konservatif karena penggunaan fade margin 10 dB dan asumsi sensitivitas penerima -100 dBm; nilai ini dapat membesar bila parameter perangkat diperbarui dengan data operator.

Hasil perencanaan cakupan ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai skala infrastruktur yang dibutuhkan. Kebutuhan sembilan belas site untuk melayani wilayah seluas 590 km<sup>2</sup> mencerminkan tantangan geografis kepulauan, di mana jarak antarpulau dan kontur permukaan memengaruhi pola perambatan sinyal. Apabila operator memilih pita frekuensi yang lebih rendah, radius sel berpotensi membesar sehingga jumlah site dapat berkurang, namun hal ini harus dipertimbangkan bersama ketersediaan spektrum dan tingkat interferensi. Selain faktor teknis, penentuan lokasi site juga perlu memperhatikan ketersediaan lahan, akses transportasi untuk pemeliharaan, serta pasokan energi yang andal, mengingat sebagian pulau belum memiliki jaringan listrik yang stabil. Faktor-faktor non-teknis ini sering kali menjadi penentu keberhasilan penggelaran di wilayah terpencil, dan apabila diabaikan dapat menyebabkan biaya aktual jauh melampaui estimasi awal.

Hasil perhitungan kebutuhan 19 site ini dapat dibandingkan dengan kondisi infrastruktur eksisting di lapangan. Berdasarkan data Dinas Komunikasi dan Informatika Kabupaten Kepulauan Anambas, hingga tahun 2024 telah terbangun sekitar 66 tower BTS yang tersebar pada 29 titik lokasi melalui program Badan Aksesibilitas Telekomunikasi dan Informasi (BAKTI) Kementerian Komunikasi dan Informatika (Diskominfotik Kabupaten Kepulauan Anambas, 2024). Jumlah titik lokasi eksisting tersebut berada pada rentang yang sebanding dengan hasil perencanaan model ini, yang menunjukkan bahwa estimasi kebutuhan site dalam penelitian ini realistis dan selaras dengan skala penggelaran aktual di wilayah tersebut. Perbedaan jumlah unit BTS dengan jumlah site model disebabkan oleh adanya beberapa operator dan perangkat pada satu lokasi, serta karena infrastruktur eksisting sebagian besar masih bertumpu pada menara USO berkapasitas terbatas, sehingga peningkatan menjadi layanan 4G LTE penuh tetap memerlukan investasi tambahan.

Tabel 2 menunjukkan bahwa kebutuhan site di Anambas terutama ditentukan oleh luas wilayah yang harus dijangkau, dengan kepadatan satu site per sekitar 31 km<sup>2</sup> sebagai konsekuensi permukiman yang tersebar antarpulau.

Tabel 2. Hasil Perencanaan Cakupan 4G LTE

Parameter	Nilai	Satuan
EIRP	56,00	dBm
MAPL	146,00	dB
Faktor koreksi a(hm)	0,043	dB
Radius sel	1,90	km
Luas sel (heksagonal)	9,36	km <sup>2</sup>
Luas efektif tercapak	531,00	km <sup>2</sup>
Jumlah sektor	57	sektor
Jumlah site (eNodeB)	19	site

### 3.2. Hasil Analisis Kapasitas

Hasil analisis kapasitas disajikan pada Tabel 3. Dengan efisiensi spektral 1,6 bps/Hz, kapasitas per sektor menjadi 16 Mbps sehingga total kapasitas jaringan mencapai 912 Mbps. Kebutuhan kapasitas pada jam sibuk sebesar 228 Mbps untuk 1.140 pengguna sibuk, sehingga faktor overprovisioning sebesar empat kali. Nilai ini jauh lebih realistis dibanding asumsi efisiensi spektral teoretis, namun tetap menunjukkan bahwa kapasitas bukan kendala utama.

Tabel 3. Hasil Analisis Kapasitas 4G LTE

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas per sektor	16	Mbps
Total kapasitas jaringan	912	Mbps
Pengguna sibuk	1.140	pengguna
Kebutuhan kapasitas	228	Mbps
Margin kapasitas	684	Mbps
Faktor overprovisioning	4	kali
Kapasitas memadai	Ya	-

Tabel 3 menegaskan bahwa jaringan di Anambas bersifat coverage-limited, yaitu jumlah site ditentukan oleh kebutuhan cakupan geografis dan bukan oleh kebutuhan kapasitas. Implikasinya, penambahan site terutama diperlukan untuk menjangkau wilayah, bukan untuk menambah daya tampung pengguna.

Kondisi coverage-limited yang ditemukan pada jaringan Anambas memiliki konsekuensi penting terhadap strategi penggelaran. Karena jumlah site ditentukan oleh kebutuhan menjangkau wilayah dan bukan oleh beban trafik, penambahan kapasitas melalui perangkat tambahan tidak akan meningkatkan utilisasi secara proporsional. Sebaliknya, sebagian besar kapasitas yang terpasang akan menganggur sepanjang umur jaringan, sehingga rasio antara biaya dan trafik yang dilayani menjadi sangat tidak efisien dibandingkan wilayah perkotaan. Pola ini umum dijumpai pada wilayah berkepadatan rendah dan menjadi salah satu penyebab utama tingginya biaya per pengguna pada daerah terpencil, sebagaimana juga diidentifikasi dalam studi penggelaran pita lebar perdesaan (Koratagere Anantha Kumar & Oughton, 2023). Implikasinya, optimasi pada wilayah seperti Anambas sebaiknya tidak diarahkan pada peningkatan kapasitas, melainkan pada penurunan biaya cakupan, misalnya melalui pemilihan pita frekuensi yang lebih rendah untuk memperluas radius sel, penggunaan menara bersama, atau pemanfaatan teknologi backhaul alternatif yang lebih ekonomis. Dengan memahami karakteristik ini sejak tahap perencanaan, penyelenggara dan regulator dapat menyusun strategi yang lebih tepat sasaran untuk wilayah perbatasan kepulauan.

Lebih jauh, karakteristik coverage-limited ini berimplikasi pada pemilihan strategi teknologi jangka panjang. Karena utilisasi kapasitas pada wilayah seperti Anambas cenderung rendah, investasi pada

perangkat berkapasitas tinggi menjadi kurang efisien dibandingkan investasi yang berorientasi pada perluasan cakupan dengan biaya rendah. Operator dapat mempertimbangkan penggunaan konfigurasi perangkat yang lebih sederhana, pemanfaatan menara bersama, atau integrasi dengan solusi non-terrestrial seperti komunikasi satelit untuk menjangkau pulau-pulau terpencil yang tidak ekonomis dilayani melalui menara konvensional. Pendekatan bertahap, yang memprioritaskan pusat-pusat permukiman terlebih dahulu sebelum memperluas ke wilayah berpenduduk jarang, juga dapat membantu menyeimbangkan antara cakupan layanan dan keberlanjutan finansial. Dengan demikian, perencanaan tidak cukup berhenti pada penentuan jumlah site, tetapi perlu mempertimbangkan keseluruhan arsitektur pengeluaran yang sesuai dengan karakteristik permintaan wilayah.

### 3.3. Hasil Analisis Kelayakan Finansial

Ringkasan investasi dan metrik finansial ditunjukkan pada Tabel 4. Total CAPEX pengeluaran 19 site mencapai Rp28,27 miliar dengan OPEX tahunan Rp6,44 miliar. Dengan 4.788 pelanggan aktif dan ARPU Rp43.400 per bulan, pendapatan tahunan sebesar Rp2,49 miliar, masih jauh di bawah OPEX tahunan, sehingga NPV lima tahun bernilai negatif Rp43,24 miliar dengan ROI -69,8 persen dan payback period tidak tercapai. Indikator Internal Rate of Return (IRR) tidak dapat ditentukan karena arus kas bersih bernilai negatif pada seluruh tahun proyeksi, sehingga tidak terdapat tingkat diskonto yang membuat NPV sama dengan nol. Kondisi ini menegaskan bahwa proyek tidak menghasilkan pengembalian positif sepanjang periode analisis.

Tabel 4. Hasil Analisis Kelayakan Finansial 4G LTE

Metrik	Nilai	Satuan
Total CAPEX	28.272	Juta Rp
Total OPEX tahunan	6.441	Juta Rp
Pelanggan aktif	4.788	jiwa
Pendapatan tahunan	2.493,59	Juta Rp
Profit bersih tahunan	-3.947,41	Juta Rp
NPV (5 tahun)	-43.235,79	Juta Rp
ROI (5 tahun)	-69,8	%
Payback period	Tidak tercapai	tahun

Untuk memungkinkan replikasi perhitungan, rincian komponen CAPEX dan OPEX per site disajikan pada Tabel 7 dan Tabel 8. CAPEX per site sebesar Rp1.488 juta dan OPEX per site sebesar Rp339 juta per tahun, yang apabila dikalikan dengan 19 site menghasilkan total CAPEX Rp28.272 juta dan total OPEX Rp6.441 juta per tahun.

Tabel 7. Rincian Komponen CAPEX per Site

Komponen	Biaya per site (Juta Rp)	Total 19 site (Juta Rp)
Menara dan pekerjaan sipil	600	11.400
Perangkat RAN	540	10.260
Sistem catu daya	58	1.102
Backhaul	240	4.560
Integrasi dan manajemen proyek	50	950
Total	1.488	28.272

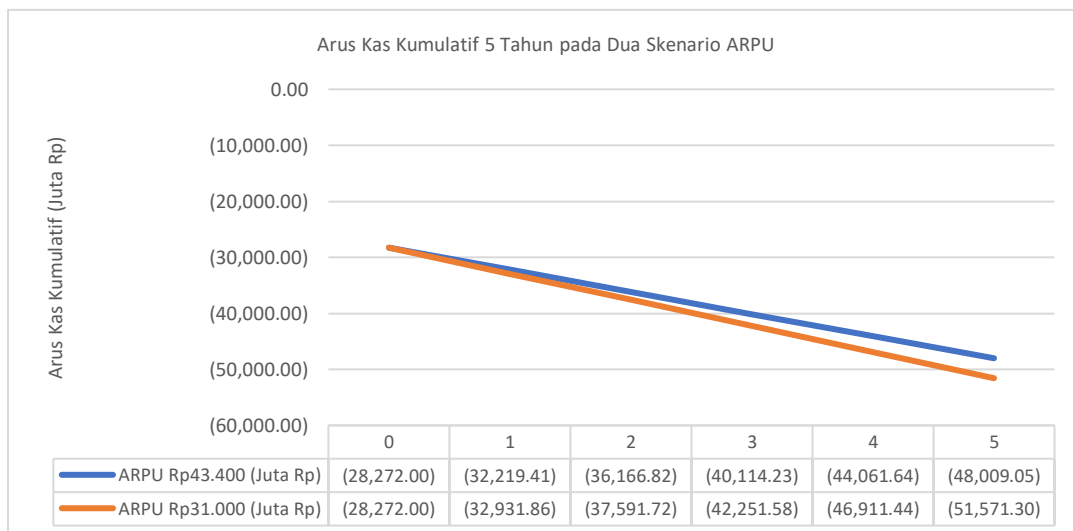
Tabel 8. Rincian Komponen OPEX per Site per Tahun

Komponen	Biaya per site/tahun (Juta Rp)	Total 19 site/tahun (Juta Rp)
Sewa lahan	50	950
Listrik	216	4.104
Pemeliharaan	15	285
Operasi backhaul	33	627
Operasi lainnya	25	475
Total	339	6.441

Tabel 7 menunjukkan bahwa komponen terbesar CAPEX adalah menara dan pekerjaan sipil serta perangkat RAN, yang mencerminkan tingginya biaya konstruksi dan logistik di wilayah kepulauan. Pada sisi OPEX, Tabel 8 memperlihatkan bahwa biaya listrik merupakan komponen dominan akibat ketergantungan pada catu daya mandiri di lokasi yang belum terjangkau jaringan listrik yang andal, diikuti biaya operasi backhaul. Struktur biaya ini menegaskan bahwa upaya menurunkan biaya penggelaran di Anambas paling efektif diarahkan pada efisiensi catu daya dan berbagi infrastruktur menara serta backhaul.

Arus kas kumulatif selama lima tahun digambarkan pada Gambar 3. Kedua skenario ARPU menunjukkan tren menurun karena pendapatan tahunan tidak menutup OPEX, sehingga akumulasi kas semakin negatif dari tahun ke tahun.

Pola arus kas yang negatif sepanjang periode analisis ini menegaskan bahwa tanpa intervensi, proyek tidak akan pernah mencapai titik pengembalian modal dalam horizon yang wajar. Hal ini memiliki konsekuensi langsung terhadap perilaku investasi operator, yang secara rasional akan memprioritaskan wilayah dengan kepadatan permintaan tinggi dan menunda atau menghindari penggelaran di wilayah terpencil. Akibatnya, kesenjangan digital antara wilayah perkotaan dan wilayah 3T berpotensi melebar apabila penyediaan layanan sepenuhnya diserahkan pada mekanisme pasar. Kondisi inilah yang menjadi dasar pembenaran atas keberadaan skema kewajiban pelayanan universal, di mana negara mengambil peran untuk menutup selisih kelayakan finansial demi menjamin pemerataan akses. Analisis kuantitatif yang disajikan dalam penelitian ini dapat membantu regulator memperkirakan besaran dukungan yang diperlukan secara lebih akurat, sehingga alokasi anggaran subsidi menjadi lebih tepat sasaran dan akuntabel.



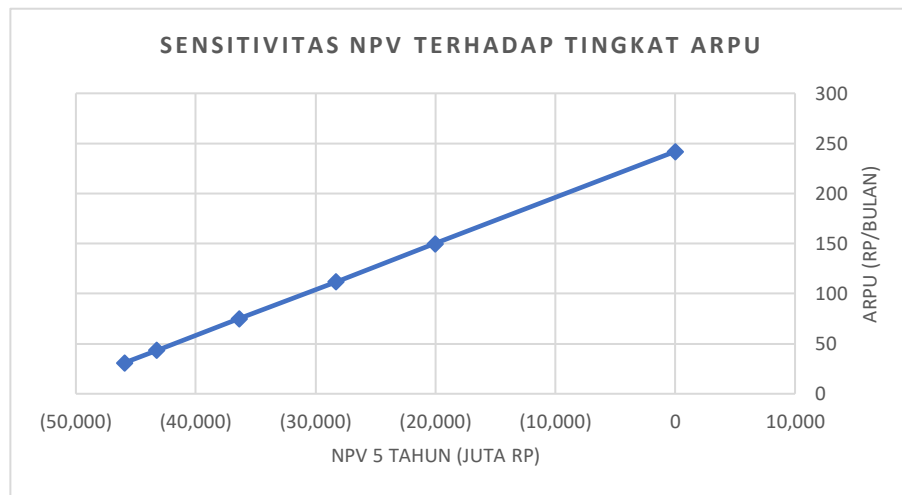
Gambar 3. Arus Kas Kumulatif 5 Tahun pada Dua Skenario ARPU

### 3.4. Analisis Sensitivitas dan Pembahasan

Untuk menilai pengaruh ARPU terhadap kelayakan, dilakukan analisis sensitivitas sebagaimana Tabel 5 dan Gambar 4. Hasilnya menunjukkan bahwa NPV baru menutup OPEX tahunan pada ARPU sekitar Rp112.000 per bulan dan baru mencapai titik impas (NPV nol) pada ARPU sekitar Rp242.000 per bulan.

Tabel 5. Sensitivitas NPV terhadap ARPU

ARPU (Rp/bulan)	NPV (Juta Rp)	ROI (%)
31.000	-45.937	-82,4
43.400	-43.236	-69,8
75.000	-36.353	-37,7
112.000	-28.272	0,0
150.000	-20.018	38,5
242.000	0	131,9



Gambar 4. Sensitivitas NPV terhadap Tingkat ARPU

Tabel 5 memperlihatkan kesenjangan mendasar antara kelayakan teknis dan finansial. Secara teknis, 19 site menyediakan cakupan dan kapasitas yang memadai bagi seluruh populasi target. Namun secara finansial, kombinasi biaya tetap tinggi pada wilayah kepulauan, terutama backhaul dan kelistrikan, dengan basis pelanggan kecil dan ARPU rendah membuat pendapatan tidak mampu menutup biaya operasional. Ambang ARPU impas sekitar Rp242.000 per bulan jauh melampaui daya beli masyarakat rural Anambas, sehingga penggelaran murni komersial tidak realistis.

Temuan ini konsisten dengan praktik penyediaan layanan di wilayah 3T melalui skema subsidi USO/BAKTI (Dinas Komunikasi dan Informatika Provinsi Kepulauan Riau, 2025). Berdasarkan analisis sensitivitas, besaran subsidi dapat diperkirakan dari selisih antara pendapatan pada ARPU realistis dan biaya yang harus ditutup agar NPV mencapai nol. Dengan demikian, kelayakan proyek perlu dibingkai sebagai kelayakan dengan dukungan subsidi, dan hasil kuantitatif ini dapat menjadi dasar perumusan besaran subsidi yang dibutuhkan untuk menjamin layanan di wilayah perbatasan.

### 3.5. Analisis Sensitivitas Multivariabel

Untuk menguji ketahanan hasil terhadap perubahan asumsi, dilakukan analisis sensitivitas tambahan terhadap tiga variabel utama, yaitu CAPEX, OPEX, dan jumlah pelanggan, masing-masing divariasikan sebesar -20 persen hingga +20 persen dari nilai dasar. Hasil perubahan NPV (dalam juta rupiah) disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Sensitivitas NPV terhadap CAPEX, OPEX, dan Jumlah Pelanggan (Juta Rp)

Variabel	-20%	-10%	Basis	+10%	+20%
CAPEX	-37.581	-40.409	-43.236	-46.063	-48.890
OPEX	-38.352	-40.794	-43.236	-45.677	-48.119
Jumlah pelanggan	-45.126	-44.181	-43.236	-42.291	-41.345

Tabel 6 menunjukkan bahwa NPV tetap bernilai negatif pada seluruh skenario, sehingga ketidaklayakan proyek bersifat struktural dan tidak dapat diatasi hanya dengan perubahan moderat pada satu variabel. Variabel CAPEX memberikan pengaruh terbesar terhadap NPV, diikuti OPEX, sedangkan perubahan jumlah pelanggan memberikan pengaruh paling kecil karena rendahnya basis pendapatan akibat ARPU yang terbatas. Bahkan pada skenario paling optimistis (CAPEX dan OPEX turun 20 persen serta jumlah pelanggan naik 20 persen secara bersamaan), NPV masih bernilai negatif sekitar Rp30,81 miliar, sementara pada skenario paling pesimistis NPV memburuk hingga sekitar Rp55,66 miliar. Temuan ini memperkuat kesimpulan bahwa kelayakan jaringan 4G LTE di Anambas tidak dapat dicapai melalui efisiensi biaya semata, melainkan memerlukan dukungan kebijakan berupa subsidi atau skema berbagi infrastruktur.

Implikasi dari temuan ini dapat dilihat dari dua sudut pandang. Dari sisi penyelenggara jaringan, penggelaran 4G LTE secara mandiri di Anambas sulit dijustifikasi karena arus kas yang terus negatif sepanjang periode analisis, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Hal ini sejalan dengan kesimpulan Koratagere Anantha Kumar dan Oughton (2023) dan Rech et al. (2025) bahwa wilayah berkepadatan rendah cenderung mengalami kegagalan pasar dalam penyediaan layanan telekomunikasi. Dari sisi pemerintah, hasil analisis sensitivitas memberikan dasar kuantitatif untuk merancang intervensi. Selisih antara biaya yang harus ditutup agar NPV mencapai nol dan pendapatan pada ARPU realistis merepresentasikan kebutuhan subsidi minimal yang harus disediakan melalui skema USO/BAKTI. Alternatif lain yang dapat menurunkan ambang kelayakan adalah penerapan skema berbagi infrastruktur, baik berbagi pasif berupa menara bersama maupun berbagi aktif berupa jaringan akses radio bersama, yang menurut Frank et al. (2022) mampu menekan belanja modal dan operasional secara signifikan. Kombinasi antara subsidi yang tepat sasaran dan berbagi infrastruktur berpotensi mengubah proyek yang semula tidak layak menjadi berkelanjutan secara finansial, sekaligus memastikan masyarakat di wilayah perbatasan memperoleh akses telekomunikasi yang setara dengan wilayah lain. Oleh karena itu, kerangka analisis yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan bagi regulator dalam menetapkan prioritas dan besaran pembiayaan penggelaran jaringan di daerah 3T. Hasil ini sejalan dengan studi tekno-ekonomi di wilayah perkotaan yang menunjukkan kelayakan finansial positif ketika kepadatan permintaan tinggi (Ni'amah et al., 2025), sehingga kontras dengan kondisi wilayah perbatasan berkepadatan rendah seperti Anambas yang justru memerlukan dukungan subsidi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa keputusan penggelaran infrastruktur telekomunikasi di wilayah 3T tidak dapat dilepaskan dari konteks kebijakan publik. Model tekno-ekonomi terintegrasi yang dilengkapi analisis sensitivitas terbukti mampu menghubungkan aspek teknis dengan kelayakan finansial sekaligus menghasilkan estimasi kebutuhan subsidi yang dapat ditindaklanjuti oleh pemangku kepentingan. Dengan pendekatan ini, perencanaan jaringan di wilayah perbatasan dapat dilakukan secara lebih transparan, terukur, dan berorientasi pada pemerataan akses digital yang berkeadilan.

Tingginya biaya penggelaran di Anambas dibandingkan studi sejenis di wilayah perkotaan dapat dijelaskan oleh beberapa faktor struktural yang khas wilayah kepulauan. Pertama, komponen logistik menjadi jauh lebih mahal karena pengangkutan perangkat, menara, dan bahan bakar harus dilakukan melalui jalur laut antarpulau yang bergantung pada cuaca dan ketersediaan armada. Kedua, sebagian besar lokasi belum memiliki jaringan listrik yang andal sehingga setiap site memerlukan sumber energi mandiri yang menaikkan belanja modal dan biaya operasional. Ketiga, konektivitas wilayah ini bertumpu pada satu jalur backhaul serat optik Palapa Ring Barat, sehingga tidak terdapat redundansi dan setiap gangguan dapat menghentikan layanan secara menyeluruh, sebagaimana pernah terjadi di kawasan ini (Diskominfo Kabupaten Natuna, 2021). Kombinasi ketiga faktor tersebut membuat biaya

per pengguna di Anambas jauh melampaui wilayah dengan kepadatan tinggi, sekaligus menegaskan kebaruan konteks penelitian ini yang tidak dapat digeneralisasi langsung dari temuan studi tekno-ekonomi di wilayah urban.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menafsirkan hasilnya. Pertama, analisis bertumpu pada parameter masukan berupa asumsi dan data sekunder, sehingga nilai jumlah site, kapasitas, dan metrik finansial dapat berubah apabila digunakan data lapangan aktual dari operator setempat. Kedua, analisis sensitivitas pada penelitian ini difokuskan pada variabel ARPU, sedangkan faktor lain seperti besaran CAPEX, OPEX, tingkat adopsi pelanggan, dan skema berbagi infrastruktur juga berpotensi memengaruhi kelayakan secara signifikan dan belum dimodelkan secara terpisah. Ketiga, horizon evaluasi dibatasi selama lima tahun, sehingga belum mencerminkan keseluruhan umur ekonomis perangkat. Keterbatasan-keterbatasan ini sekaligus membuka peluang penelitian lanjutan untuk memvalidasi model dengan data empiris dan memperluas cakupan variabel yang dianalisis.

#### 4. KESIMPULAN

Penggelaran jaringan 4G LTE di Kabupaten Kepulauan Anambas membutuhkan 19 site eNodeB untuk mencakup wilayah seluas 590 km<sup>2</sup> dengan radius sel 1,90 km berdasarkan model COST-231 Hata, dan kapasitas jaringan yang dihasilkan melampaui kebutuhan permintaan sehingga jaringan bersifat coverage-limited. Secara finansial proyek tidak layak komersial murni karena menghasilkan NPV negatif sebesar Rp43,24 miliar dan ROI -69,8 persen pada ARPU Rp43.400 per bulan, dan analisis sensitivitas menunjukkan kelayakan baru tercapai pada ARPU sekitar Rp242.000 per bulan yang tidak realistis bagi masyarakat setempat. Hasil ini menegaskan bahwa pemerataan akses telekomunikasi di pulau perbatasan terpencil memerlukan dukungan pembiayaan pemerintah melalui skema subsidi USO/BAKTI, dengan besaran yang dapat diperkirakan dari analisis sensitivitas.

Penelitian selanjutnya disarankan memvalidasi parameter dengan data lapangan operator, memperpanjang horizon analisis mengikuti umur ekonomis perangkat, dan mengkaji skema berbagi infrastruktur untuk menurunkan ambang kelayakan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik Kabupaten Kepulauan Anambas. (2024). *Kabupaten Kepulauan Anambas dalam angka 2024*. Badan Pusat Statistik Kabupaten Kepulauan Anambas. <https://anambaskab.bps.go.id/publication/2024/02/28/be3b83d5aaba81da8c5c8f8b/kabupaten-kepulauan-anambas-dalam-angka-2024.html>
- Dinas Komunikasi dan Informatika Provinsi Kepulauan Riau. (2025). Kemkomdigi Beri Lampu Hijau Penuntasan Area Blankspot serta Pengembangan Kawasan AI dan Pusat Data di Kepulauan Riau. *Kepripro. Go.Id*. <https://www.kepripro. go. id/berita/pemprov-kepri/kemkomdigi-berilampu-hijau-penuntasan-area-blankspot-serta-pengembangan-kawasan-ai-dan-pusat-data-di-kepulauan-riau>
- Diskominfo Kabupaten Natuna. (2021, February 8). Akses Telekomunikasi Palapa Ring Barat Sempat Terputus Akibat Kerusakan Kabel Fiber Optik. *Diskominfo Kabupaten Natuna*. <https://diskominfo.natunakab.go.id/akses-telekomunikasi-palapa-ring-barat-sempt-akibat-kerusakan-kabel-fiber-optik/>
- Diskominfo Kabupaten Kepulauan Anambas. (2024, 28 Maret). Diskominfo buka suara soal kondisi jaringan telekomunikasi di Anambas. *Antena.id*. <https://www.antena.id/2024/03/diskominfo-buka-suara-soal-kondisi.html>
- Frank, H., Colman-Meixner, C., Assis, K. D. R., Yan, S., & Simeonidou, D. (2022). Techno-Economic Analysis of 5G Non-Public Network Architectures. *IEEE Access*, 10, 70204–70218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187727>
- Hikmaturokhman, A., Pranindito, D., & Irawan, A. (2018). Analisis Tekno Ekonomi Perancangan 4G LTE di Kabupaten Banyumas. *Jurnal ECOTIPE*, 5(1), 15–32. <https://doi.org/10.33019/ecotipe.v5i1.448>

- Huawei Technologies Co., Ltd. (2010). *LTE Radio Network Planning Introduction*. Huawei Technologies Co., Ltd.
- Husna, A., & Budiman, L. (2023). *Menghubungkan yang tak terhubung: Pelajaran dari penyediaan akses internet di daerah 3T (Makalah Kebijakan No. 61)*. Center for Indonesian Policy Studies.
- Kebos, C., Manafe, B., & Rantelobo, K. (2022). ANALISIS PENGUKURAN PERFORMANSI JARINGAN 4G LTE PADA AREA LAHAN KERING KEPULAUAN (STUDI KASUS DI WILAYAH AMARASI, KEC. TTS, NTT). *Jurnal Media Elektro*, 11(2), 156 - 165. <https://doi.org/10.35508/jme.v0i0.8208>
- Koratagere Anantha Kumar, S., & Oughton, E. J. (2023). Techno-economic assessment of 5G infrastructure sharing business models in rural areas. *Frontiers in Computer Science*, 5, 1191853. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2023.1191853>
- Nashiruddin, M. I., Rahmawati, P., Nugraha, M. A., Hanuranto, A. T., Suryanegara, M., & Fuadah, Y. N. (2024). Sensitivity Options of 5G Non-Standalone Deployment Strategies: A Simulation Model for Emerging Countries. *TEM Journal*, 36–49. <https://doi.org/10.18421/TEM131-04>
- Naufallia, A. N., Isnawati, A. F., & Ni'amah, K. (2021). Planning of Indoor Femtocell Network for LTE 2300 MHz on Railways Carriages Using Radiowave Propagation Simulator 5.4. *JURNAL INFOTEL*, 13(1), 18–24. <https://doi.org/10.20895/infotel.v13i1.542>
- Ni'amah, K., Larasati, S., Pradana, Z. H., & Romadhona, S. (2025). Urban 5G NR deployment: A techno-economic case study in Semarang. *Jurnal Teknik Elektro*, 17(1), 12–19. <https://doi.org/10.15294/jte.v17i1.27119>
- Putri, D. A., Hikmaturokhman, A., Najmi, M., Rinjani, D. A., Veranda, D., & Fauzan, D. A. (2024). PERENCANAAN COVERAGE JARINGAN SELULER MENGGUNAKAN FREKUENSI 1800 MHZ DI KAWASAN DERMAGA ADIPALA CILACAP DENGAN MEMBANDINGKAN SKENARIO MU-MIMO DAN SU-MIMO. *JIKO (Jurnal Informatika Dan Komputer)*, 8(2), 340. <https://doi.org/10.26798/jiko.v8i2.1203>
- Rech, J., Vasconcelos, D. D. S., & Travassos, X. L. (2025). Cost–Benefit Assessment of 5G Rollout: Insights from Brazil. *Telecom*, 6(3), 44. <https://doi.org/10.3390/telecom6030044>
- Sahal Fatah, M. F., & Hikmaturokhman, A. (2025). Analisis Perencanaan Cakupan Jaringan 4G LTE Pada Frekuensi 1800 Mhz Di Wilayah Pekalongan Dengan Perbandingan MU-MIMO dan SU-MIMO. *JIKO (Jurnal Informatika Dan Komputer)*, 9(2), 311. <https://doi.org/10.26798/jiko.v9i2.1672>
- Salamah, M., Hidayat, R., & Pratama, Y. (2016). Analisis Jaringan LTE pada Frekuensi 700 MHz dan 1800 MHz dengan Pendekatan Tekno Ekonomi. *InComTech*, 7(1), 1–18.
- Sirmayanti, S., Ihsary, M., & Mahjud, I. (2025). Utilizing Compact 4G LTE Mobile Stations to Enhance Network Coverage in Rural Low-Signal Areas. *Jurnal IPTEK*, 29(2), 145–158. doi:<https://doi.org/10.31284/j.ipitek.2025.v29i2.7732>
- Smura, T. (2012). *Techno-economic Modeling of Wireless Network and Industry Architecture* [Doctoral dissertation]. Aalto University.
- Souza, M. A. D., Kuribayashi, H. P., Saraiva, P. A., Farias, F. D. S., Vijaykumar, N. L., Frances, C. R. L., & Costa, J. C. W. A. (2021). A Techno-Economic Framework for Installing Broadband Networks in Rural and Remote Areas. *IEEE Access*, 9, 58421–58447. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071919>
- Telkom Indonesia. (2025). *Nine Months of 2025 Results*. Telkom Indonesia. [https://www.telkom.co.id/minio/show/data/lampiran/1761838522183\\_original\\_TLKM-9M25-Info-Memo.pdf](https://www.telkom.co.id/minio/show/data/lampiran/1761838522183_original_TLKM-9M25-Info-Memo.pdf)
- Utama, R., Salim, T. I., & Hidayat, A. (2017). Analisis Tekno Ekonomi Kelayakan Migrasi Jaringan 2G/3G ke 4G LTE di DKI Jakarta. *InComTech*, 7(2), 113–128.
- Wahyudin, A., Suryanegara, M., & Rohman, I. K. (2025). Towards understanding the economic impact of 4G Internet in underserved areas: Early evidence from 6 provinces in Indonesia. *2025 IEEE*

*17th Malaysia International Conference on Communication (MICC)*, 13–18.  
<https://doi.org/10.1109/MICC66164.2025.11210935>

Wicaksono, R. P., Mustakim, H. U., & Purnama, A. F. (2024). Technical and economic analysis for 5G NR network non-standalone planning in Yogyakarta City using 2300 MHz frequency. *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication*. 5(1).  
<https://doi.org/10.52435/complete.v5i1.520>